

接收机自主完好性监测算法研究

陈小平, 滕云龙

(电子科技大学电子科学技术研究院 成都 610054)

【摘要】 卫星导航接收机自主完好性监测RAIM是利用接收机自身的冗余观测值进行卫星故障的检测和识别, 根据现有RAIM算法进行故障检测, 有较大的漏警率。该文通过研究基于最小二乘残差的故障检测和识别方法, 提出了一种改进的RAIM算法, 有效地降低了漏警率。该算法在某型号接收机的相关实验中取得了较好的效果。

关键词 故障检测; 故障识别; 漏警率; 最小二乘残差法; 接收机自主完好性监测
中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A

Study of Receiver Autonomous Integrity Monitoring Algorithm

CHEN Xiao-ping and TENG Yun-long

(Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The receiver autonomous integrity monitoring (RAEM) uses the redundant measurements to detect and exclude fault. The probability of missed detection is high when using the current RAIM algorithm in fault detection. An improved RAIM algorithm which can reduce the probability of missed detection is presented in this paper. The approach of fault detection and identification based on least squares residuals method is studied. The experimental results in a certain type of receiver indicate that this algorithm is effective.

Key words fault detection; fault identify; least squares method; probability of missed detection; receiver autonomous integrity monitoring

完好性是指卫星定位误差超过允许门限时, 系统能够及时给出告警的能力^[1]。接收机自主完好性监测(RAIM)是指利用接收机自身冗余的观测值对卫星故障进行检测和识别^[2-6]。根据现有RAIM算法计算出的检测门限 T_D 在进行故障检测时, 有较大的漏警率, 不能满足定位结果的高可靠性要求^[7-9]。

本文针对上述问题, 提出了改进的RAIM算法。该算法基于最小二乘残差原理进行故障检测和识别, 在故障检测过程中引入调整系数 K , 有效地降低了漏警率; 然后综合考虑了卫星几何分布以及漏警率 P_{MD} 等因素, 根据HPL方法判断RAIM算法是否可用, 并给出了仿真结果。

1 RAIM算法描述

1.1 最小二乘残差法的基本原理

伪距观测模型可以表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

式中 \mathbf{y} 为观测伪距与近似计算伪距差值的 n 维矢量; n 为卫星数; \mathbf{G} 为表示观测矩阵; \mathbf{X} 为四维待解

参数矢量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为 n 维观测伪距噪声矢量。

根据最小二乘原理, 向量 \mathbf{X} 的最小二乘解为:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{y} \quad (2)$$

伪距残差向量为:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{y} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{y} = [\mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T] \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

令 $\mathbf{Q} = \mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T$, 则式(3)可简化为:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{Q}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

1.2 基于残差平方和的故障检测

由式(4)知, 向量 $\boldsymbol{\omega}$ 中包含了卫星伪距误差信息, 用作判断有无故障卫星的依据^[10]。令 $\mathbf{SSE} = \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega}$, 表示各个卫星伪距残差的平方和, 在实际应用中, 采用 $T_X = \sqrt{\mathbf{SSE}/(n-4)}$ 作为统计检测量。若伪距测量误差 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 中的各个分量相互独立且服从均值为零、方差为 σ_0^2 的正态分布, 根据统计分布理论, \mathbf{SSE}/σ_0^2 服从自由度为 $n-4$ 的 χ^2 分布; 若 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的均值不为零, 则 \mathbf{SSE}/σ_0^2 服从自由度为 $n-4$ 的非中心化 χ^2 分布, 非中心化参数 $\lambda = E(\mathbf{SSE}/\sigma_0^2)$ 。故统计假设有两类:

(1) 无故障假设 H_0 :

$$E(\boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{0}, \text{ 则 } \mathbf{SSE}/\sigma_0^2 \sim \chi^2(n-4).$$

(2) 有故障假设 H_1 :

$$E(\boldsymbol{\varepsilon}) \neq \mathbf{0}, \text{ 则 } \mathbf{SSE}/\sigma_0^2 \sim \chi^2(n-4, \lambda).$$

在无故障卫星时, 系统处于正常状态, 如果出现告警, 则为误警。因此, 给定误警率 P_{FA} , 有下面的概率等式成立:

$$P_r(\mathbf{SSE}/\sigma_0^2 < T^2) = \int_0^{T^2} f_{\chi^2(n-4)}(x) dx = 1 - P_{FA} \quad (5)$$

根据上式确定的 T^2 , 可计算出检测门限 $T_D = \sigma_0 \sqrt{T^2/(n-4)}$ 。将实时计算的 T_X 与 T_D 相比较, 若 $T_X > T_D$, 则表示检测到故障, 向用户发出告警。

根据上述算法确定的检测门限 T_D , 有较大的漏警率, 不能满足高可靠性的要求。为了有效降低漏警率, 本文引入了调整系数 K , 工程中实际的检测门限改为: $T'_D = T_D \times K$, 且 $0 < K \leq 1$ 。

1.3 基于残差元素的故障识别

为了在检测到故障后, 准确地找到故障星, 通常采用子集比较法、奇偶矢量法和极大似然估计法来识别故障星。这三种方法使用不同的识别依据, 但都是通过解析残差来寻找故障星, 都可归结为将似然比与一个门限进行比较。在故障识别过程中, 考虑到运算速度的影响, 极大似然估计法和最小二乘故障检测法配合使用效果较好。

当测量噪声服从均值为零的正态分布时, 故障识别的依据为:

$$\lambda(i) = \boldsymbol{\omega}^2(i)/\mathbf{Q}(i,i) \quad i=1,2,\dots,n$$

式中 $\boldsymbol{\omega}(i)$ 表示伪距残差向量的第 i 个元素;

$\mathbf{Q}(i,i)$ 表示矩阵 \mathbf{Q} 对角元素上第 i 个元素。通过比较各卫星的 λ 值, 其值最大的为故障卫星。

1.4 RAIM算法可用性判断

在实际工程中进行故障检测和识别之前, 首先要判断RAIM算法是否可用。在某些空间位置, 当卫星数目少于5颗, 没有冗余卫星信息, 则RAIM算法不可用; 当卫星数不少于5颗时, 对RAIM算法是否可用需采用一定的算法进行判断。对于后者, 本文采用水平定位误差保护限值(HPL)方法来判断RAIM算法是否可用。

假定卫星存在故障, 则 \mathbf{SSE}/σ_0^2 服从自由度为 $n-4$ 的非中心化 χ^2 分布^[4]。给定漏警率 P_{MD} , 可以确定非中心化参数 λ 为:

$$P_r(\mathbf{SSE}/\sigma_0^2 < T^2) = \int_0^{T^2} f_{\chi^2(n-4,\lambda)}(x) dx = P_{MD} \quad (6)$$

令 $\mathbf{S} = \mathbf{I} - \mathbf{Q} = \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}$, 则:

$$\text{HPL} = \max_{i=1,2,\dots,n} \left\{ \sqrt{[\mathbf{S}^2(1,i) + \mathbf{S}^2(2,i)]/\mathbf{Q}(i,i)\sigma_0\sqrt{\lambda}} \right\} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{S}(1,i)$ 、 $\mathbf{S}(2,i)$ 分别表示矩阵 \mathbf{S} 的第1行及第2行的第 i 个元素。在每次要检测之前, 首先计算 HPL 的值, 将其与门限 HPL 相比较, 若 $\text{HPL} > \text{HPL}$, 则 RAIM算法不可用。

表1给出了当漏警率 $P_{MD} = 0.001$ 、误警率 $P_{FA} = 1/15\ 000$ 时, 不同可见卫星数对应的非中心化参数 λ 的值。

表1 不同可见卫星数对应的 λ 值

卫星数	λ	卫星数	λ
5	54.760 0	10	69.555 6
6	58.522 5	11	71.910 4
7	62.568 1	12	73.444 9
8	64.802 5	13	74.995 6

2 仿真及结论

试验结合在某型号接收机研制过程中出现的导航可靠性问题, 给出了当漏警率 $P_{MD} = 0.001$ 、误警率 $P_{FA} = 1/15\ 000$ 、门限 $\text{HAL} = 556\ \text{m}$ 时, 不同调整系数 K 对应的RAIM算法的可用性、漏警率、误警率的统计结果, 如表2所示。

表2 不同调整系数 K 对应的统计结果

K	算法可用性(%)	漏警率	误警率
1.00	99.980	0.00 112	0.000 051
0.95	99.980	0.00 105	0.000 053
0.90	99.980	0.00 101	0.000 056
0.85	99.980	0.00 098	0.000 060
0.80	99.980	0.00 095	0.000 062
0.75	99.980	0.00 090	0.000 062
0.70	99.980	0.00 086	0.000 062

从表2中数据可以看出, 在本文改进的RAIM算法中, 通过引入调整系数 K , 有效降低了漏警率, 达到了提高可靠性的目的。仿真结果显示, 本文提出的改进RAIM算法不仅计算简单, 而且有效可行。

3 结束语

本文结合某型号接收机的导航可靠性问题, 提出了改进的RAIM算法。该算法基于最小二乘残差原理进行故障的检测和识别, 在故障检测过程中引入调整系数 K , 有效地降低了漏警率; 综合考虑了卫

星几何分布以及漏警率 P_{MD} 等因素,采用HPL方法判断RAIM算法是否可用。仿真结果证明了本文提出的改进RAIM算法有效地降低了漏警率。

参 考 文 献

- [1] 孙明菡, 孙国良. 接收机自主完好性检测可用性判断方法研究[J]. 遥测遥控, 2006, 27(2): 24-27.
- [2] 刘 准, 陈 哲. GPS自主完整性检测技术研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(8): 673-676.
- [3] 陈金平. GPS完善性增强研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院, 2001.
- [4] 王永超, 黄智刚. 三种导航卫星故障识别方法的等价性研究[J]. 遥测遥控, 2006, 27(1): 51-55.
- [5] 翁 健. GPS接收机自主完善性监测算法及研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1997.

- [6] 廖向前, 黄顺吉. 奇偶矢量法用于GPS的故障检测与隔离[J]. 电子科技大学学报, 1997, 26(3): 262-267.
- [7] 邱致和, 王万义. GPS原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 195-204.
- [8] MISRA P, BAYLISS E, LAFREY R, et al. Receiver autonomous integrity monitoring(RAIM) of GPS and GLONASS[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1993, 40(1): 87-104.
- [9] BROWN A. Baseline GPS RAIM: scheme and a note on the equivalence of three RAIM methods[J]. Journal of The Institute of Navigation, 1992, 39(3): 301-316.
- [10] KAPLAN E D. Understanding GPS: principles and applications[M]. Norwood, USA: Artech House Inc, 1996: 230-245.

编辑 张俊

(上接第193页)

4 结 论

针对基于二阶循环统计量进行定时误差估计的算法,需要较长的观测时间长度的特点,本文分析了频偏对算法的影响。通过仿真结果可以看出,虽然算法估值精确度随观测时间长度取值的增大(即统计信息量的增大)而提高,但同时频偏的影响也随之增大。并且当 L 取值超过一定量时,频偏对算法性能的恶化程度较大。因此在实际应用中,应根据频偏大小并结合实际系统性能需求,选择合适的观测时间长度及各类参数。

参 考 文 献

- [1] GINI F, GIANNAKIS G B. Frequency offset and symbol timing recovery in flat-fading channels: a cyclostationary approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(3): 400-411.
- [2] GHOGHO M, SWAMI A, DURRANI T. On blind carrier recovery in time-selective fading channels[J]. Signals, Systems and Computers, 1999, 1: 243-247.
- [3] SCOTT K E, OLASZ E B. Simultaneous clock phase and frequency offset estimation[J]. IEEE Transactions on

Communications, 1995, 43(7): 2263-2270.

- [4] OERDER M, MEYR H. Digital filter and square timing recovery[J]. IEEE Transactions on Communications, 1988, 36(5): 605-612.
- [5] PANAYIRCI E, BAR-NESS E Y. A new approach for evaluating the performance of a symbol timing recovery system employing a general type of nonlinearity[J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(1): 29-33.
- [6] WANG Y, SERPEDIN E, CIBLAT P. Blind feedforward cyclostationarity-based timing estimation for linear modulations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(3): 709-715.
- [7] 冯 祥, 李建东. 基于循环累积量的QAM信号载波相位估计算法[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(1): 48-50.
- [8] 刘 鹏, 李兵兵, 卢朝阳, 等. 基于部分检测相关的OFDM符号同步新算法[J]. 吉林大学学报, 2006, 24(2): 120-124.
- [9] SERPEDIN E, CIBLAT P, GIANNAKIS G B, et al. Performance analysis of blind carrier phase estimators for general QAM constellations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(8): 1816-1823.
- [10] 张贤达. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

编辑 黄莘